



HAL
open science

Le changement climatique, facteur structurant de transformation pour la gestion durable des forêts: article de synthèse

Jean-Francois Dhote, Sophie Cornu, Christine Deleuze, Philippe Dreyfus, Myriam Legay, Brigitte Demesure-Musch

► To cite this version:

Jean-Francois Dhote, Sophie Cornu, Christine Deleuze, Philippe Dreyfus, Myriam Legay, et al.. Le changement climatique, facteur structurant de transformation pour la gestion durable des forêts: article de synthèse. *Innovations Agronomiques*, 2015, 47, pp.131-156. 10.15454/1.4622695368946316E12 . hal-02638171

HAL Id: hal-02638171

<https://hal.inrae.fr/hal-02638171>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Le changement climatique, facteur structurant de transformation pour la gestion durable des forêts: article de synthèse

Dhôte J.F.¹, Cornu S.², Deleuze C.³, Dreyfus P.⁴, Legay M.⁵, Musch B.⁶

¹ INRA, UR0588 Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières, Orléans

² Office National des Forêts, Dépt Recherche-Développement-Innovation, Fontainebleau,

³ Office National des Forêts, Dépt Recherche-Développement-Innovation, Dole

⁴ Office National des Forêts, Dépt Recherche-Développement-Innovation, Avignon

⁵ Office National des Forêts, Dépt Recherche-Développement-Innovation, Nancy

⁶ Office National des Forêts, Dépt Recherche-Développement-Innovation, Orléans

Correspondance: dhote@nancy.inra.fr

Résumé

Le changement climatique structure la réflexion prospective sur la gestion durable des forêts, ses évolutions et les besoins d'innovation associés. L'Office National des Forêts présente ici une lecture de l'état des connaissances et des questions posées, à partir de laquelle il a défini ses priorités R&D: le travail a porté sur les principaux aspects de la gestion durable dans la définition de la Conférence d'Helsinki ; le contexte d'application est celui des forêts publiques françaises de métropole. Vis-à-vis du changement climatique, différents points de vue peuvent être adoptés : (i) impacts, prévention des risques et gestion des crises ; (ii) adaptation de la gestion ; (iii) contribution à l'atténuation via la production de bois ; (iv) continuité/qualité des services écosystémiques. L'analyse ne fait pas apparaître de contradictions entre ces différents points de vue, en revanche elle montre (i) les opportunités offertes par les innovations liées à la bioéconomie ; (ii) la nécessité de mieux expliciter les objectifs poursuivis (notamment dans la gestion de la biodiversité) ; (iii) l'intérêt de concentrer l'effort de R&D et innovation sur une série de leviers permettant une gestion active et diversifiée des forêts, gage de continuité des services écosystémiques, atténuation des risques et sécurisation des approvisionnements à la filière bois.

Mots-clés : Gestion forestière durable, Changement climatique, Forêts publiques, R&D, Innovation

Abstract: Climate change, a key driver defining a sustainable forest management. Review paper.

Climate change is a major driver of sustainable forest management change. In this paper, R&D engineers of the French National Forest Service reviewed several aspects of sustainable forest management in the light of climate change, in order to identify research and innovation priorities. Climate change may be addressed with various points of view: (i) impacts, risk prevention and crisis management; (ii) adaptation of forest management; (iii) contribution to mitigation through wood production and use; (iv) continuity and quality of ecosystem services. The state of the art and ongoing questions were outlined, according to the specific challenges of a public service managing 25% of the mainland forest area, supplying 40% of exchanged timber, and particularly concerned by different national and European policies (forestry-wood chain, climate change, biodiversity conservation, energy transition, natural risk mitigation and prevention, water). The horizon scan did not suggest obvious contradictions between the different points of view. It showed (i) the potential opportunities brought by innovations linked to bioeconomy (bio-based production chains and markets); (ii) the need for a more explicit and integrated statement of management objectives, especially those regarding timber use and conservation of biodiversity; (iii) the impact of concentrating R&D investments and innovations to

support an active, diversified forest management, condition for continuously providing high-quality ecosystem services, mitigating risks and securing a sufficient supply to the forest industries.

Keywords: Sustainable forest management, Climate change, Public forests, R&D, Innovation

Introduction

Depuis 20 ans, le cadre de la réflexion sur les relations entre gestion des forêts, société et environnement a été profondément transformé par les différentes facettes de la question climatique :

- Evidences répétées et globales attestant la réalité du changement climatique ; gravité des impacts et risques associés aux différents scénarios envisagés pour les décennies à venir (GIEC, 2013),
- Prise de conscience de l'imminence de la crise des énergies fossiles et de la profondeur de ses impacts socio-économiques (Jancovici et Grandjean, 2006 ; Giraud, 2014),
- Caractère structurant des tendances et événements extrêmes climatiques, qui affectent environnement naturel, viabilité des activités, conditions socio-économiques et modes de vie,
- Entrelacement des deux dimensions de la crise environnementale actuelle, *le climat et la biodiversité*, très sensible pour les forêts qui co-évoent avec les sociétés humaines (Descola, 2014),
- Changement de paysage, opportunités et risques induits par les stratégies d'adaptation, la valorisation du carbone renouvelable et la bioéconomie (Colonna, 2012 ; Hetemäki *et al.*, 2014 ; Mathijs *et al.*, 2015).

La déclaration de la Conférence ministérielle sur la protection des forêts réunie à Helsinki (Forest Europe, 1993) a fourni une définition de la gestion durable des forêts et ébauchait déjà les principaux points de vue sur le changement climatique : impacts, risques, atténuation, adaptation, services rendus par la forêt. Dans la « *prospective sur la forêt, sa filière et leurs liens au territoire* » de Sébillotte *et al.* (1998), le rôle de la forêt et des industries forestières dans le cycle du carbone et la régulation du climat était présenté sans relief particulier, tout comme la conservation de la biodiversité, parmi les divers services rendus à la société. Dans ces deux textes, le changement climatique restait hypothétique : dans Sébillotte *et al.* (1998), le mot *climat* apparaît 10 fois en 250 pages (*effet de serre* 2 fois, *biodiversité* 26 fois), et seulement 3 fois pour évoquer un changement (« *prédire [la dynamique des écosystèmes] sur le long terme en fonction de sylvicultures adoptées et dans un contexte climatique peut-être en évolution (effet de serre)* », p 216).

Enfin, la forêt et sa gestion se trouvent au croisement de dynamiques socio-économiques et industrielles concernant des enjeux aussi variés que la filière forêt-bois, l'énergie, le climat, la biodiversité, l'eau. De manière croissante, leurs évolutions posent des questions de santé publique (maladies infectieuses, allergènes, incendies : Kochi *et al.*, 2012 ; Richardson *et al.*, 2012). Ces enjeux sont portés par des acteurs dont certains sont nouveaux venus dans le jeu forestier (énergéticiens, chimistes, industries extractives, ingénieurs formés par les « sciences dures », mécènes, consommateurs urbains...), éloignés culturellement des problématiques d'exploitation de ressources renouvelables.

Il est d'autant plus important, pour les forestiers, d'explicitier à nouveau le sens qu'ils donnent à leur action : quelles options et pratiques constituent la gestion durable aujourd'hui ? Nous tentons d'y répondre ici par une revue des différentes facettes de cette gestion durable, en essayant de repérer des verrous et leviers vis-à-vis des évolutions qui semblent nécessaires pour faire face au changement climatique, puis de préciser des pistes de R&D et d'innovation à explorer en priorité.

Les conclusions retirées de l'analyse sont conçues pour la situation des forêts publiques françaises. La gestion de celles-ci doit prendre en compte l'ensemble des demandes socio-économiques exprimées dans la politique forestière nationale et les engagements européens, telles qu'elles se traduisent dans le contrat d'objectifs et de performances de l'Office National des Forêts (ONF), en les déclinant à différents niveaux de gestion et selon les contextes locaux. Le cadre particulier du changement climatique accentue simultanément le besoin de connaissances scientifiques, en appui à la gestion, mais aussi la nature évolutive, incertaine et révisable de ces mêmes connaissances. Par rapport à certaines caractéristiques de la science contemporaine, notamment la spécialisation des équipes, l'importance des situations-modèles et le caractère localisé des sites-ateliers, transférer vers plusieurs milliers de praticiens de terrain une connaissance évolutive et incertaine demande des capacités particulières de mise en contexte, généralisation et traduction, ce qui constitue l'une des justifications de l'effort R&D de l'ONF.

L'idée qui a guidé cette revue systématique est que, même si la définition d'Helsinki reste valide, les modalités pratiques dans lesquelles peut se traduire la gestion durable ont perdu leur caractère d'évidence. Ainsi, commentant les conséquences à tirer des changements environnementaux pour les forêts du sud-ouest de l'Allemagne, von Teuffel estimait en 1999 que « *pour définir la durabilité, on doit avoir un système de valeurs auquel se référer [...] Pendant les 200 dernières années, cette question ne se posait pas, parce qu'il existait une compréhension partagée sur le fait qu'il était nécessaire de continuer à accumuler du capital sur pied. [...] Une nouvelle augmentation du volume sur pied ne paraît plus avoir de sens, parce qu'elle serait associée à un accroissement des risques pour la santé des arbres adultes, de la sensibilité aux tempêtes et autres dommages* » (traduit de l'anglais).

L'analyse a considéré les impacts du changement climatique, l'adaptation et l'atténuation ; la production-bois comme fournisseur de la bioéconomie et en relation avec les autres services écosystémiques ; les pratiques de conservation et gestion dynamique de la biodiversité ; nous terminons par quelques questions sur les bases de la gestion durable. Grâce à des procédures de veille mutualisée mises au point par le centre de documentation technique et générale de l'ONF, l'analyse a porté sur un large corpus dont nous conservons quelques 170 références : rapports d'expertise nationaux et internationaux, communications, newsletters (European Forest Institute, ParisTech, ...), ouvrages spécialisés, articles tirés de près de 50 journaux scientifiques différents (13 revues sur la forêt et ses produits, 17 revues en écologie et sciences de la conservation, 6 revues d'économie et politique, 6 revues généralistes à très fort impact et 4 revues techniques).

1. Impacts : anticiper le caractère émergent des crises

Les climatologues estiment qu'une caractéristique du changement climatique attendu sera sa rapidité sans précédent (Masson-Delmotte, 2011). Les impacts forestiers ont bénéficié de nombreux éclairages au cours des quinze dernières années (Saxe et al., 2001 ; Broadmeadow et al., 2005) :

- **Tendances** : un déplacement des aires de répartition des espèces, déjà perceptible en altitude, moins net en latitude (Loustau et al., 2004 ; Lenoir et al., 2008 ; Bertrand et al., 2011) ; d'importants changements de productivité enregistrés dans certaines régions au cours du 20^{ème} siècle, avec une mise en évidence du rôle des dépôts atmosphériques azotés (Thomas et al., 2010 ; Bontemps et al., 2011), et des signes plus discrets suggérant qu'un maximum de productivité a été atteint au milieu des années 1980 pour certaines essences comme le hêtre (Charru et al., 2010),
- **Crises** : des syndromes de dépérissements, consécutifs à des sécheresses aigües dont la répétition future devrait avoir un impact majeur sur l'état de santé et la productivité (Becker et Levy, 1988 ; Bréda et al., 2006 ; Klos et al., 2009 ; Allen et al., 2010), sur la biodiversité

(Beaumont *et al.*, 2011 ; Carnicer *et al.*, 2011) et sur les risques d'incendies (Chatry *et al.*, 2010),

- **Répétitions et conjonctions de crises** : deux tempêtes majeures se sont succédé en moins de 10 ans dans le Sud-Ouest du pays, faisant perdre à la pinède aquitaine la moitié de son stock aérien initial, suivies d'attaques de processionnaire du pin puis d'une épidémie de scolytes sans précédent (25 000 ha, environ 5 Mm³ de pins maritimes scolytés, soit 70% de la récolte annuelle ; Jactel, 2011).

Alors que nous disposons d'expertises sur chacun des aléas (tempêtes, incendies, sécheresse, insectes, champignons pathogènes...), le défi actuel est d'anticiper des crises de grande portée, aux effets potentiellement déstabilisants, des combinaisons inédites, surprises et phénomènes émergents (Lagadec, 2010) : « *Les défis actuels pour la modélisation des perturbations dans les écosystèmes forestiers sont [...] (iii) d'intégrer des perturbations multiples dans des modèles dynamiques d'écosystèmes pour l'aide à la décision en gestion forestière ; (iv) de combiner des capacités de changement d'échelle à travers plusieurs niveaux d'organisation et une représentation de la complexité du système qui capture le comportement émergent des régimes de perturbation* » (Seidl *et al.*, 2011, traduction de l'anglais).

Anticiper le caractère émergent des crises va au-delà de la gestion de crise (Gauquelin *et al.*, 2010) : cela recouvre notamment le repérage systématique des vulnérabilités organisationnelles et des impasses techniques et sylvicoles, ainsi que la préparation stratégique (provisions financières, mesures de précaution logistiques pour absorber les chocs, atténuation des points chauds de vulnérabilité...). Les coûts de cette préparation doivent être considérés en regard des importantes conséquences économiques potentielles du changement climatique pour la filière-bois et donc pour la viabilité de la gestion forestière (Peltola *et al.*, 2010 ; Hanewinkel *et al.*, 2012).

2. Adaptation au changement climatique et incertitude

En 2008 et 2009, plusieurs importants rapports d'expertise internationale sont parus sur l'adaptation de la gestion forestière au changement climatique. Le rapport publié par l'*European Forest Institute* (Lindner *et al.*, 2008), tout en insistant davantage sur la gestion des ressources génétiques, converge largement avec le rapport mondial IUFRO (Seppälä *et al.*, 2009), dont nous soulignons les conclusions suivantes : « *La gestion forestière durable est essentielle pour réduire la vulnérabilité des forêts au changement climatique. [...] Il n'y a pas de mesure universellement applicable pour adapter les forêts au changement climatique. Les gestionnaires forestiers devraient donc bénéficier d'une flexibilité suffisante pour déployer les mesures d'adaptation les plus appropriées pour leurs situations locales. La recherche doit être amplifiée pour réduire les incertitudes actuelles quant aux impacts du changement climatique sur les forêts et populations, et pour améliorer les connaissances sur les mesures de gestion et politiques pour l'adaptation. Néanmoins, malgré les limites de nos connaissances actuelles, le changement climatique progresse trop vite pour qu'on puisse différer les actions d'adaptation en attente des résultats des études à venir* » (traduction de l'anglais).

L'élément central dans la réflexion sur l'adaptation est l'incertitude (Millar *et al.*, 2007 ; Detten, 2010 ; Seidl et Lexer, 2013 ; Lindner *et al.*, 2014 ; Bellassen et Luysaert, 2014). Par contraste avec l'incertitude « de fond » qui concerne tout engagement de long-terme, l'incertitude associée à l'adaptation au changement climatique prend une nouvelle dimension. Elle recouvre :

- Une part d'indétermination : trajectoires sociales, technologiques et politiques, niveau des émissions de gaz à effet de serre, effectivité des mesures d'adaptation, phénomènes écologiques émergents,

- Des incertitudes liées à l'état de la connaissance : incomplétude et erreurs des modèles climatiques, phénomènes de rétroaction imprévus, capacité des écosystèmes à évoluer rapidement, performance des méthodes de modélisation employées (Cheaib *et al.*, 2012),
- Des incertitudes liées à l'enchaînement de raisonnements climatique, écologique, sylvicole, numérique (« cascade des incertitudes »), chaque étape étant entachée d'erreurs, impasses et imprécisions,
- Et enfin des incertitudes de localisation : nous anticipons avec un fort niveau de probabilité que le climat va se réchauffer au niveau planétaire, mais nous connaissons moins bien l'intensité et les modalités du changement au niveau régional, *a fortiori* local.

La palette des réactions individuelles à l'incertitude est assez large, entre les attitudes considérant l'incertitude comme un frein à l'adaptation (« *j'ai besoin d'en savoir plus avant de décider* ») ou un stimulus pour innover (« *l'existant ne constitue plus une norme à respecter, puisque de toute façon les communautés vont se recomposer* »). L'incertitude est en réalité la matière même du problème de l'adaptation : cela explique par exemple le caractère devenu paradoxal des principes de gestion forestière durable, au moment même où on les invoque comme condition d'adaptation (cf *supra* et UE, 2014). Ainsi, Detten (2010) constate simultanément que « *dans une situation de risque, incertitude, ignorance et indétermination, [...] les idées de confiance, de sécurité et de planification stratégique à long-terme deviennent de plus en plus importantes* » mais il ajoute plus loin que « *à la lumière des résultats des sciences écologiques modernes, et considérant le cycle de production à long-terme en foresterie, il y a des doutes concernant un pilotage des écosystèmes forestiers orienté vers des objectifs précis, quels que soient l'élaboration et l'ambition des concepts de gestion forestière* » (traduction de l'anglais).

En outre, l'inconfort de constater qu'un raisonnement sur la prévention des risques pourrait remettre en cause les orientations dominantes de gestion (ou en relativiser la portée) peut conduire à entretenir certaines ambiguïtés : « *adapter les forêts aux tempêtes extrêmes est une exception - en dehors de la Grande-Bretagne et de l'Irlande où il existe déjà de telles stratégies de gestion -, et exige des mesures telles que limiter la hauteur des arbres qui ne sont pas populaires et vont à l'encontre de la foresterie « proche de la nature » à longues révolutions, dominante en Europe Centrale* » (Lindner *et al.*, 2014, traduction de l'anglais).

Le consensus est à peu près acquis sur la nécessité de localiser les situations les plus critiques (Bolte *et al.*, 2009), comprendre ce qui s'y passe et prendre dès maintenant des décisions d'adaptation dans ces cas précis, malgré les incertitudes et lacunes scientifiques : « *La gestion est critique pour une réponse positive de la croissance forestière à un climat plus chaud, et la sélection des meilleures espèces pour les nouvelles conditions sera d'une importance vitale* » (Saxe *et al.*, 2001, traduction de l'anglais).

3. Sur le plan R&D, nous avons commencé à défricher trois questions :

- Décrire les stations en climat changeant. Synthèse de l'effet des différents facteurs environnementaux, l'approche stationnelle classique n'est plus adaptée à un climat en évolution ; cependant, apprécier la vulnérabilité des peuplements requiert de bien connaître leurs conditions de croissance. Pour cela, de nouvelles méthodes doivent être mises au point, en s'appuyant sur des modélisations plus pertinentes des relations station-production et sur des données spatialisées de climat et de sol (Bontemps et Bouriaud, 2013 ; Richard *et al.*, 2013),
- Choisir des essences adaptées à un climat en évolution suppose de mieux connaître l'autécologie des essences. La synthèse des connaissances actuelles peut se décliner en monographies, fiches autécologiques, listes d'espèces d'intérêt potentiel, guide pour la mise en

place de tests d'espèces. Les axes de progrès visent d'une part à explorer les possibilités d'utilisation de modèles dynamiques pour l'aide à la décision, d'autre part à analyser les introductions passées afin d'éclairer la programmation de nouvelles expériences.

- Agir sur le bilan hydrique par la maîtrise de la densité des peuplements : la principale piste pour atténuer le risque de stress hydrique est de réduire la surface foliaire au moyen d'éclaircies (Bréda *et al.*, 2006). Cette question peut être abordée en étudiant les effets de la sylviculture sur la réponse des arbres au climat, par exemple dans les réseaux expérimentaux du GIS Coopérative (Trouvé *et al.*, 2014).

4. Atténuer le changement climatique

La gestion des forêts constitue l'un des leviers pour atténuer le changement climatique. Pour mettre en œuvre les politiques européenne et nationales de transition énergétique et réduction des émissions de CO₂, on anticipe une sollicitation très importante de la biomasse forestière : par exemple, selon la prospective ADEME (2013), la consommation française annuelle de bois sous les différentes formes de bioénergies progresserait de 21 à 50 Mm³/an d'ici 2050, le taux de prélèvement sur l'accroissement net passant de 50% (2010) à 75% (2050).

Une mobilisation accrue de bois est rendue possible par l'existence, depuis une trentaine d'années, d'un écart important et croissant entre accroissement biologique et récolte, un phénomène constaté dans toute l'Europe (Liski *et al.*, 2006 ; Ciais *et al.*, 2008). En France, la quinzaine d'études de ressource et disponibilité réalisées depuis 10 ans, à partir des données de l'Inventaire Forestier National, a montré l'existence de disponibilités théoriques abondantes, complémentaires aux usages actuels, compatibles avec le respect des principes de gestion durable et en appliquant simplement l'état de l'art sylvicole. La majorité de ces disponibilités supplémentaires se situent en forêt privée, il en existe aussi dans les forêts publiques, en forêt communale, en montagne, dans les bois feuillus de qualité secondaire, petits bois et menus bois que le renchérissement du bois-énergie peut rendre exploitables (IFN-FCBA-SOLAGRO, 2009), dans les très gros bois résineux qui répondent mal à la demande industrielle actuelle (Colin, 2014).

La possibilité que ces disponibilités théoriques soient effectivement mobilisées dépend *a priori* de conditions de natures assez différentes :

- Prix suffisants, rentabilisant la gestion durable, y compris les surcoûts éventuels induits par les conditions suivantes,
- Existence d'une desserte forestière suffisante, notamment en montagne (le taux d'équipement routier des Alpes françaises est 3 fois plus faible que celui de l'Autriche), disponibilité de solutions mécanisées et chaînes logistiques adaptées (têtes d'abattage pour feuillus, abatteuses, porteurs, récolte par câble),
- Appui sur une estimation plus précise de la biomasse sur pied, les tarifs de cubage usuels étant peu adaptés pour estimer la ressource en branches et bois de petite section ; une meilleure connaissance de ce gisement est nécessaire pour la ressource forestière française, qui compte $\frac{2}{3}$ d'arbres feuillus et beaucoup de peuplements issus du taillis-sous-futaie (Deleuze *et al.*, 2013),
- Mesurer les impacts sur les écosystèmes de scénarios de prélèvement plus exhaustif de la biomasse, en ce qui concerne la fertilité chimique des sols, les risques de tassement et la biodiversité (Dahlberg *et al.*, 2011 ; Verschuyt *et al.*, 2011 ; Bouget *et al.*, 2012 ; Achat *et al.*, 2015),
- Mettre au point des méthodes de diagnostic, prévention, compensation et restauration, par exemple en recyclant en forêt les cendres de chaufferies-bois dont la production pourrait dépasser 100 000 t/an en 2020 (Pitman, 2006 ; Augusto *et al.*, 2008 ; Deleuze *et al.*, 2012),

- Comprendre les freins de nature socio-économique qui s'opposent actuellement à une mobilisation accrue du bois, malgré les avantages en matière de durabilité qui lui sont reconnus ; développer des outils de communication et de gouvernance permettant de les surmonter.

5. Produire du bois, pour assurer la continuité des services écosystémiques

La production de bois approvisionne une filière industrielle d'environ 400 000 emplois, soit l'équivalent de l'automobile pour la France. Cette activité est habituellement considérée comme rurale, diffuse sur le territoire à l'image de la ressource forestière et non délocalisable. Ainsi, le produit-bois fourni par l'écosystème-forêt contribue à l'activité économique, à l'emploi et à la vitalité des territoires. Ces impacts de la forêt sur la société (et notamment le caractère non délocalisable) ne sont effectifs et durables que si les différentes activités de la filière forêt-bois restent viables technologiquement et économiquement, depuis la sylviculture jusqu'à la seconde transformation et au recyclage des produits-bois en fin de vie. Or à l'amont de la filière, la production-bois est le seul service rémunéré, avec la chasse, et les inquiétudes sur la compétitivité des entreprises valent également pour la filière forêt-bois en dépit de l'augmentation tendancielle de la demande.

En outre, la production de bois est le seul moyen connu pour façonner le couvert forestier, ce qui est important pour garantir la continuité des principaux services écosystémiques : comment gérer le couvert à coût supportable, pour réduire sa consommation d'eau, sans commercialiser du bois ? Ainsi, le développement du marché bois-énergie, si le prix d'achat est suffisant, peut rentabiliser des travaux auxquels on avait renoncé depuis 30 ans (absence de débouché et renchérissement de la main d'œuvre forestière) ; dans ce sens, il permet de reconsidérer les itinéraires sylvicoles et apporte sa part au financement des travaux d'adaptation et prévention des risques climatiques.

Enfin, la production de bois constitue en elle-même une action pour l'environnement à travers les économies d'énergie et la réduction des émissions de CO₂ que permettent les différents usages du bois (effet de substitution à des matériaux ou énergies ayant des bilans environnementaux moins favorables), mais aussi du fait qu'une gestion active des forêts contribue de manière significative à la protection contre ou l'atténuation de la gravité des risques naturels (défense des forêts et protection de l'habitat contre l'incendie ; protection contre les avalanches, chutes de blocs, glissements de terrain et régulation des crues ; stabilisation des dunes et constitution de digues naturelles performantes).

6. Répondre à la demande en bois pour approvisionner la bioéconomie

À partir des récents travaux de prospective sur l'alimentation, l'agriculture et la forêt, ou de l'observation des phénomènes d'accaparement des terres (*land grabbing*), on s'attend au cours des prochaines décennies à voir réapparaître une tension pour l'usage de terres (INRA-CIRAD, 2009 ; UNECE-FAO, 2011 ; Lambin et Meyfroid, 2011 ; Houllier, 2011 ; INRA, 2015) qui résultera de la croissance démographique, du développement humain et des nouveaux compromis à trouver à l'échelle mondiale pour produire durablement.

La stratégie de l'Union Européenne sur la bioéconomie (Hall, 2012 ; Hetemäki *et al.*, 2014) vise ainsi à promouvoir la production durable de toutes ressources biologiques renouvelables et leur conversion en denrées, bioproduits et bioénergies. La filière forêt-bois est considérée comme exemplaire des nouvelles filières biosourcées qui prendront le relais de celles fondées sur les ressources fossiles :

- Elle fonctionne déjà selon des principes de sobriété et d'économie circulaire avec l'utilisation en cascade, des niveaux élevés de recyclage, la valorisation des co-produits,
- Elle fournit et protège des biens publics : propreté de l'air et de l'eau, sols fertiles et exploitables, paysages, biodiversité,

- Elle contribue à traiter des défis sociaux comme le changement climatique et l'épuisement des ressources : séquestration du carbone, substitution du bois aux produits plus énergivores.

Le bois a de nombreuses opportunités d'usage, à des degrés divers de maturité technologique et commerciale, grâce à une combinaison :

- De propriétés anatomiques, mécaniques, physiques et chimiques associées à la structure interne multi-échelle (structure qui permet aux arbres de résoudre divers défis mécaniques et écologiques),
- De facteurs de performance élevés (lorsqu'on rapporte la fonction assurée à la masse ou aux bilans énergétiques et environnementaux),
- D'innovations rapides dans les modes de consommation et fabrication (produits, procédés),
- De possibilités de diversification des industries existantes (papeteries évoluant en bioraffineries).

Quelques produits sont illustrés dans le Rapport "*Prospective sur le marché actuel des nouveaux produits issus du bois et des évolutions à échéance 2020*" (PIPAME-ALCIMED¹, 2012) : bois abové, bois plastique, électronique imprimée, biocombustible (granulés), combustibles solides de récupération,...

De nouvelles voies de transformation du bois et de valorisation de ses différentes fractions émergent, stimulées par la recherche technologique (Celzard et Leban, 2013 ; Lacoste *et al.*, 2014) : chimie de la cellulose, de l'hémicellulose, de la lignine, des métabolites secondaires ; ingénierie de matériaux tels que résines, mousses, conçus pour remplir des fonctions particulières (thermiques, physiques...) ; énergie (chaleur, co-génération, biocarburants). L'usage de structures bois audacieuses dans des bâtiments emblématiques (Centre Pompidou-Metz) manifeste la performance, la modernité et la polyvalence du matériau-bois. Tout en continuant de fournir des spécialités de niche, par exemple via des co-produits (extractibles des nœuds : Kebbi-Benkeder *et al.*, 2014), la forêt est sollicitée pour alimenter des marchés de masse au cœur de la transition écologique : équipements publics, infrastructures, construction, rénovation thermique de l'habitat ancien, sans oublier les papiers-cartons que nos sociétés numériques continuent de consommer en grandes quantités.

Ces nouvelles possibilités suscitent en retour des questions (ONF, 2012) : la forêt sera-t-elle capable de fournir durablement les ressources en bois attendues ; comment va-t-on solliciter les importations et les ressources locales ; les nouveaux usages offriront-ils des débouchés rémunérateurs pour des sylvicultures à cycle court et faible diamètre d'exploitabilité ; comment faire évoluer les sylvicultures pour atteindre de manière cohérente les objectifs de valorisation du bois, de prévention des risques et d'adaptation au changement climatique ; comment organiser les relations entre acteurs de la bioéconomie pour qu'une partie de la valeur créée par les innovations en aval « remonte » vers l'amont de la filière et finance les coûts de la durabilité ?

Pour la R&D, cela conduit à s'interroger dès maintenant d'une part sur les moyens de produire davantage de biomasse sur les surfaces de forêt tempérée qui sont actuellement gérées, d'autre part sur les outils de modélisation et stratégies pour gérer au mieux les différentes valeurs-carbone de la forêt (stocks dans la biomasse et les sols, stocks dans les produits, émissions évitées) :

- Développer un savoir-faire technique sur les systèmes de production rapide de biomasse, dédiés ou semi-dédiés (TCR, futaies résineuses à courte révolution...), en évaluant les itinéraires techniques, bilans environnementaux et économiques ; certains pays (Canada, Suède, Finlande, Allemagne, Italie) investissent significativement sur ces itinéraires (Weih,

1 <http://www.industrie.gouv.fr/p3e/etudes-prospectives/bois/marche-du-bois.pdf>

2004 ; Carle *et al.*, 2011 ; González-García *et al.*, 2013 ; Bastien *et al.*, 2013 ; Navarro *et al.*, 2014),

- Mieux mesurer la « valeur-carbone » associée à la forêt et au bois : on manque de modélisations et de métriques appropriées pour comparer des options de gestion ; répondre à ce besoin suppose de renseigner non seulement la dynamique du carbone dans l'écosystème (Agren *et al.*, 2003 ; Jandl *et al.*, 2007 ; Rötzer *et al.*, 2010), mais également le devenir du carbone dans les produits forestiers selon les scénarios d'utilisation jusqu'en fin de vie (Ximenes, 2006 ; Nunery et Keeton, 2010 ; May *et al.*, 2012), ainsi que les bénéfices de substitution, c'est-à-dire la quantité d'émissions de CO₂ que l'usage du bois permet d'éviter par rapport aux matériaux concurrents (Sathre et O'Connor, 2010 ; Eriksson *et al.*, 2011 ; Lippke *et al.*, 2012),
- Développer des approches comparatives et optimisations de scénarios de gestion (Canadell et Raupach, 2008 ; Diaz-Balteiro et Rodriguez, 2006 ; Foley *et al.*, 2009) combinant les impacts-carbone des choix de gestion aux autres critères de décision : arbitrages entre bioénergie et stockage sur pied, entre bois-énergie et bois-matériau, entre production et conservation, entre espèces natives et introduites (Melina *et al.*, 2010 ; van Deusen, 2010 ; Davis *et al.*, 2011),
- Au niveau national, les modèles de secteur forestier permettent d'éclairer les travaux de prospective sur la forêt et ses produits (Caurla et Delacôte, 2013) : quel est l'impact-carbone de différentes politiques de mobilisation du bois (Chen *et al.*, 2010 ; Werner *et al.*, 2010) ; quels sont les impacts économiques et la faisabilité des plans nationaux de développement de l'usage du bois (Raunikar *et al.*, 2010 ; Kallio *et al.*, 2011 ; Moiseyev *et al.*, 2011).

7. Biodiversité et pratiques de gestion/conservation

Quand on les compare aux autres modes d'utilisation du territoire, les forêts sont des milieux riches en espèces et en diversité génétique, structurés, rustiques (peu d'intrants ou de régulation des aléas, forte adaptation aux fluctuations), écologiquement fonctionnels. Ceci vaut même en Europe où elles sont anthropisées depuis des millénaires. On peut considérer que les forêts jouent un rôle de sources ou réservoirs de biodiversité, vis-à-vis des autres formes d'usage du sol.

La biodiversité des forêts françaises est probablement plus élevée, du fait même de la diversité des usages du sol actuels et anciens, que si ces espaces n'avaient jamais été perturbés par l'homme ; cette thèse repose sur le constat que la végétation européenne spontanée est moins riche que celle des régions tempérées analogues, du fait de son histoire évolutive (Latham et Ricklefs, 1993 ; Kremer, 2009), que les sols et la biodiversité gardent la mémoire des usages anciens (Dupouey *et al.*, 2002) et que le fort morcellement de la propriété induit une diversité importante de modalités de gestion, types de couvert, lisières internes ou externes et habitats (Dhôte *et al.*, 2005). En l'absence de gestion, on aurait sans doute de nombreuses forêts avec des faciès peu différenciés sur le plan spécifique, comme dans les hêtraies d'Europe de l'Est ou les pessières montagnardes et subalpines (Korpel, 1995, Schütz et de Turckheim, 2010).

La sylviculture tronque les phases de délabrement et sénescence du cycle sylvigénétique et appauvrit l'écosystème en bois mort, qui constitue le substrat d'une fraction importante de la biodiversité. Divers dispositifs (arbres morts ou à cavités, îlots de vieillissement/sénescence, réserves biologiques) visent à compenser cette lacune (Bouget *et al.*, 2014). Les études comparées de forêts gérées ou en libre évolution (Paillet *et al.*, 2010) montrent que les taxons inféodés au bois-mort se réinstallent, même après un long historique de gestion, ce qui suggère qu'ils disposent de refuges dans des paysages très anthropisés (Olsson *et al.*, 2012). Une meilleure connaissance de ces refuges et de l'état de conservation des populations aiderait les gestionnaires à préciser la densité et le degré de connexité qu'il convient de maintenir dans le dispositif de conservation. Les méthodes de rétention du bois mort

présentent des externalités négatives, notamment pour la sécurité des personnes travaillant en forêt et des promeneurs, les risques phytosanitaires et risques d'incendies ; un travail d'ingénierie est nécessaire pour optimiser la répartition spatiale et temporelle du dispositif (recherche des meilleurs compromis coûts/risques/efficacité), ce qui impliquerait de mieux expliciter les objectifs et priorités de conservation.

Le changement climatique impacte déjà la structure et le fonctionnement des communautés, selon des modalités et rythmes variés, y compris des phénomènes de retard ou de blocage (Bertrand *et al.*, 2011 ; Urban *et al.*, 2012 ; Zhu *et al.*, 2012). Il est vraisemblable que les aires protégées (parcs, réserves, zones Natura 2000, îlots de vieux bois) seront impactées, aussi fortement voire davantage compte-tenu des enjeux de biodiversité qu'elles représentent (Dunlop et Brown, 2008 ; Araujo *et al.*, 2011). Cette situation interroge les principes des efforts de conservation, à commencer par l'idée de naturalité : *« Il y a un fort consensus sur le fait que les climats futurs seront entièrement nouveaux, différents de ceux du passé, ce qui conduit à des communautés non-analogues (différentes d'aucune de celles existant aujourd'hui) et à des surprises écologiques [...]. Si nous restaurons les conditions du passé, ces communautés seront très vraisemblablement dysfonctionnelles - elles ne seront plus appropriées aux climats futurs. [...] la plupart des significations habituelles de la naturalité ne fournissent plus une ligne de conduite utile pour la gestion des espaces naturels [...] Des concepts comme l'intégrité écologique et la résilience devront compléter - si ce n'est remplacer - le concept traditionnel de naturalité »* (Cole, 2008 - traduction de l'anglais). Certains auteurs se demandent si les institutions et réglementations créées pour protéger la biodiversité ne peuvent pas devenir, à certains égards, des freins vis-à-vis de l'objectif qui leur a été assigné initialement : *« la conservation de sites est un instrument indispensable, mais probablement insuffisant pour la protection de la biodiversité quand on considère le changement climatique. La nature statique des instruments de conservation implique que les aires protégées ont tendance à devenir des « institutions » (à moins qu'elles ne soient mises en cause par un intérêt concurrent) selon un paradigme de préservation qui ne permet pas un changement d'écosystèmes [...] En ce qui concerne les fonctions de facilitation et de freinage par la loi, la conservation de sites est assurément un facteur favorable, mais qui a probablement besoin d'être complété par d'autres instruments pour ne pas devenir un obstacle »* (Pettersson et Keskitalo, 2013, traduction de l'anglais).

La diversité génétique des arbres forestiers constitue une dimension importante de la biodiversité, sous forte influence des pratiques de gestion. En deux générations au plus, les arbres vont devoir exprimer leur plasticité, transmettre d'éventuelles évolutions adaptatives, et migrer spontanément ou avec assistance (Rehfeld *et al.*, 2002 ; Aitken *et al.*, 2008 ; Kremer et Delzon, 2009 ; Lefèvre *et al.*, 2013). Grâce à leur large variabilité génétique, les populations d'arbres forestiers ont un fort potentiel d'évolution adaptative rapide, comme on peut le constater avec les espèces introduites au 19^{ème} siècle. En limite d'aire, la phase critique semble être la phase juvénile (Hamrick 2004). Dans les différentes populations d'une espèce, existe-t-il une diversité permettant de résister à des changements environnementaux (Benito-Garzon *et al.*, 2011) ? Cette diversité est-elle transmise à la génération suivante lors de la régénération naturelle ? Si l'on souhaite renforcer la capacité adaptative d'une population, quelles autres provenances peut-on proposer en complément de régénération, comment le faire concrètement ? Quelles mesures de conservation faut-il prendre pour les populations en danger ? Quel est l'impact des pratiques de martelage et de régénération sur la diversité génétique des peuplements résiduels ou des semis, leur qualité génétique et leur adaptabilité (Neale 1985 ; Adams *et al.* 1998) ? Pour les essences acclimatées dont on connaît mal la base génétique, quelles places respectives attribuer à la régénération naturelle et aux plants issus de vergers à graine ? Comment sélectionner, à partir des arboretums, plantations comparatives et introductions en gestion ordinaire, des espèces-candidates qui pourraient remplacer des populations d'espèces natives devenues vulnérables ou ne fournissant plus les services recherchés ?

Les experts chargés d'évaluer la R&D de l'ONF en 2009 avaient estimé que des formules telles que "conserver, protéger, préserver" ignoraient le caractère fondamentalement dynamique de la

biodiversité : « *la diversité évolue quoi que fassent les forestiers, c'est le moteur de l'évolution et de l'adaptation ; s'il y a une chose à conserver ou protéger dans les choix de gestion, c'est plutôt la capacité des populations et communautés à évoluer* ». Pourtant, l'idée de gérer la biodiversité, et notamment de la perturber à travers une gestion volontariste des ressources génétiques, fait débat dans le monde scientifique, chez les forestiers ou les associations de protection de la nature (Hewitt *et al.*, 2011 ; McLachlan *et al.*, 2007 ; Ste-Marie *et al.*, 2011). Kremer (2009) situe les introductions d'espèces par rapport à l'histoire évolutive des arbres forestiers européens : « *la plupart des milieux ne sont pas saturés en espèces [...] L'Europe abrite ainsi quatre fois moins d'espèces d'arbres que l'Amérique et l'Asie, à des latitudes équivalentes, et des genres présents sur notre sol à la fin du tertiaire, tel le sequoia, ont aujourd'hui disparu. [...] D'une certaine façon, les introductions restaurent donc une biodiversité perdue au cours de l'histoire. [...] Trois grands bénéfices [peuvent être] apportés par les introductions : l'enrichissement de la biodiversité locale, qui jouera un rôle dans la stabilité des écosystèmes à long terme, l'atténuation des effets du changement climatique par le transfert de populations ou d'espèces, et les bénéfices (de natures alimentaire, pharmaceutique, esthétique, horticole ou autres) tirés des espèces domestiquées, dont la grande majorité (tomate, maïs, pomme de terre) ne sont pas autochtones en Europe* ».

Enfin, les options de gestion que nous prenons *ici et maintenant* doivent être resituées dans un contexte plus large. Ainsi, il n'est peut-être pas très éclairant d'opposer production et protection de la biodiversité, comme c'est l'usage dans certaines régions européennes (Winkel, 2013) : compte-tenu de l'augmentation de la consommation de bois attendue et des phénomènes de déplacements des usages, un renoncement à produire en Europe peut induire dans d'autres régions du monde des impacts indirects, éventuellement plus préoccupants, via le commerce international (pâte à papier, biocarburants, sciages, bois-énergie). Cette situation commence à être éclairée par l'étude des phénomènes de transition forestière (Meyfroidt *et al.*, 2010), et pose des questions majeures pour l'écocertification et pour l'arbitrage entre options d'usage des sols (vaut-il mieux perturber un hectare de hêtraie normande ou un hectare de forêt tropicale humide indonésienne ?).

Pour résumer, à partir d'un point de vue croisant biodiversité et changement climatique, on en vient à poser les questions suivantes :

- De quelle manière la dynamique de la biodiversité est-elle perturbée par les pratiques de gestions ; quelle est la portée temporelle de ces perturbations ; sont-elles favorables ou défavorables vis-à-vis de l'état de conservation des populations, induisent-elles une amélioration ou une dégradation des capacités évolutives de l'écosystème ?
- A quelles échelles spatiales (massif, paysage, microhabitat) s'organisent ces pressions et leurs effets sur la biodiversité ; sur quelles pratiques de gestion est-il pertinent d'agir (martelage, aménagement d'un massif, actions territoriales impliquant d'autres acteurs) ?
- Quels atouts apporte la biodiversité pour faire face au changement climatique ; quelles manières de gérer la biodiversité peuvent améliorer les différents services rendus par la forêt ?
- Quels sont les opportunités, coûts et risques de différentes options de gestion de la diversité des essences ligneuses et des ressources génétiques : utiliser la dynamique de la végétation et le cortège des essences locales, planter des variétés forestières améliorées, transférer des provenances vers des stations plus septentrionales, introduire des espèces apparentées susceptibles de s'hybrider, élargir la base génétique des espèces acclimatées, introduire des espèces exotiques ?
- Comment configurer des dispositifs dédiés à la conservation (réserves, îlots de vieux bois, arbres morts) et les insérer de manière satisfaisante dans une orientation de gestion active (réduction des âges d'exploitabilité, baisse des stocks sur pied, récolte plus complète de la biomasse) qui est préconisée pour réduire les risques et accroître les effets de substitution ?

- Quelles évolutions anticiper dans les réglementations européennes et nationales pour la protection de la nature (aires protégées, Directive Habitats), de façon à mieux prendre en compte les interactions entre biodiversité et changement climatique ?

8. Biodiversité et services écosystémiques : expliciter les objectifs, rechercher la viabilité

La notion de *service* se réfère au fait qu'il y a un usage, quand bien même cet usage n'implique pas de consommation effective (e.g. services culturels ; Costanza *et al.*, 1997). L'action de l'homme pour bénéficier du service (notamment par la gestion des écosystèmes ou la récolte) n'est exclue d'aucune des définitions recensées par Nahlík *et al.* (2012) : en particulier, il en découle que la production de bois appartient bien au champ des services écosystémiques.

La biodiversité peut être considérée soit comme contrôlant les processus à la base des services écosystémiques (rôle des communautés du sol dans la régulation des cycles biogéochimiques), soit comme un service écosystémique final en soi (diversité génétique des espèces apparentées aux variétés cultivées), soit comme un bien en soi (Mace *et al.*, 2012). Cette complexité explique qu'il n'y ait pas de stratégie univoque pour préserver ou développer les services, mais qu'on doive trouver des compromis ou arbitrages entre options contradictoires (Goldstein *et al.*, 2012), en explicitant préalablement quels services et quelles biodiversités sont recherchés (« *Différents services exigent différentes diversités* » (Perrings *et al.*, 2010, traduction de l'anglais) ; « *l'objectif actuel consistant à empêcher les changements d'espèces et d'écosystèmes est impossible à atteindre sous changement climatique ; les gestionnaires de biodiversité doivent maintenant choisir plus activement ce qu'ils vont essayer de conserver* » (Dunlop et Brown, 2008, traduction de l'anglais).

Les forêts, en particulier, sont des espaces fournissant un nombre considérable de services : leur compatibilité, l'inventaire des synergies et conflits, la recherche des compromis et stratégies d'usage du sol permettant de concilier les différentes attentes doivent être revisités, les enjeux du changement climatique amenant à porter un regard différent sur la variété des services, voire sur les priorités à expliciter pour gérer ensemble les différentes composantes de la biodiversité (par exemple, densité de la faune sauvage, composition de la flore forestière, diversité génétique et valeur adaptative des arbres forestiers parmi les semis et recrûs).

Les forestiers ne sont sans doute pas encore accoutumés à l'idée que, tout en restant tournés vers la gestion durable des ressources, les services qu'ils fournissent peuvent avoir différents niveaux de qualité (Schroter *et al.*, 2005). Les ingénieurs du domaine des transports et de l'équipement se demandent ainsi quel niveau de dégradation des infrastructures serait socialement acceptable, avec un climat qui se réchauffe rapidement et une multiplication des événements extrêmes (Lothar-Martin, Klaus, Xynthia, Katrina, Sandy, Haiyan...) ? Une transposition à la forêt serait pertinente, compte tenu du long terme des objectifs, de la profondeur des impacts et de l'importance des vulnérabilités socio-économiques.

La question de la continuité des services renvoie aux phénomènes qui peuvent compromettre certains attributs de la forêt essentiels vis-à-vis de la fourniture de certains services (Hanewinkel et Peyron, 2014) : carbone et régulation du climat, rôle de la continuité spatiale et temporelle du couvert pour la protection des enjeux humains et matériels en montagne, etc... L'interdépendance exprime le fait que la disponibilité effective de certains services est conditionnée par des choix de gestion ou des équipements décidés pour d'autres fins (routes, pare-feux), ou bien dont la réalisation est financée par un autre service (mutualisation des ressources entre différentes activités).

À l'échelle mondiale, les forêts jouent un rôle essentiel dans la régulation du cycle du carbone (Bellassen et Luysaert, 2014), ce qui situe l'importance de leur maintien en bonne santé par un renouvellement régulier et le recours à des options permettant de prévenir ou réduire les dégâts (choix

d'essences appropriés, révolutions courtes, éclaircies fortes précoces). Nous pourrions, par défaut d'adaptation, être confrontés à de vastes dépérissements : la dégradation très rapide des forêts de l'Ouest américain illustre la réalité de cette menace (Collins *et al.*, 2012 ; Moritz *et al.*, 2012 ; Wimberly et Liu, 2013) : la province de Colombie Britannique estime que les pertes sur les pins occasionnées par la gradation de *Dendroctonus ponderosae* (1999-2012) dépassent 700 millions de m³, soit 53% du stock (Walton, 2013). Même des dégâts aussi massifs finiraient par être compensés, à la longue, par la dynamique de végétation ou les reboisements ; néanmoins, le temps que ces compensations entrent en jeu, d'importants relargages de carbone sont inévitables et s'étendent sur plusieurs décennies, ce qu'illustre la liaison historique entre perturbations naturelles, âge moyen et puits de carbone dans les forêts canadiennes (Kurz et Apps, 1999). On ne peut donc pas tenir pour acquis que les forêts françaises conserveront indéfiniment leur important puits de carbone actuel, lequel devrait tôt ou tard s'évanouir avec la multiplication des grands dégâts forestiers qui résultera de la combinaison entre insuffisance de gestion et changement climatique.

Vu la trajectoire difficile que les pays développés ont devant eux, en matière de réduction des émissions, efficacité énergétique, changements de mode de vie et sobriété budgétaire, la prévention des dégâts forestiers par une gestion active est donc un levier d'action performant pour sécuriser la fourniture des services écosystémiques : « Dans ses interprétations les plus larges, le concept de services écosystémiques est souvent utilisé pour faire prendre conscience des bénéfiques très répandus et pourtant intangibles que les populations reçoivent d'écosystèmes en bonne santé » (Patterson et Coelho, 2009, traduit de l'anglais).

Sur le plan R&D, cette situation conduit à ne pas restreindre les projets de calcul économique au seul paradigme de l'optimisation, mais à chercher à appliquer aux options de gestion des méthodes telles que l'analyse de viabilité utilisée pour les pêcheries (Doyen *et al.*, 2012 ; Rapaport *et al.*, 2006).

9. Élargir et conforter les bases de la gestion durable et multifonctionnelle

Pour les forêts publiques, c'est dans la spécification des modalités de gestion durable multifonctionnelle qu'on cherche à combiner et intégrer les orientations liées à l'adaptation au changement climatique, à son atténuation et à la stabilisation des services écosystémiques attendus. Les notions de gestion durable et de multifonctionnalité connaissent actuellement une phase de redéfinition (Burger, 2009 ; Mermet et Farcy, 2011) liée à une complexité accrue et une mutation du contexte :

- La multiplication des services assurés par la forêt ou par sa gestion, services écosystémiques dont nos sociétés développées reconnaissent de plus en plus la valeur (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009), mais ne sont pas prêtes à payer le prix : un cas exemplaire est fourni par l'incapacité de la communauté internationale, malgré une forte mobilisation médiatique, à compenser l'Équateur pour éviter l'exploitation du gisement pétrolier de Yasuni (Swing, 2011) ; ces multiples services ne conduisent pas toujours à des préconisations de gestion identiques, ce qui rend nécessaire d'explicitier les cohérences, synergies, conflits, arbitrages et compromis qui les relient,
- Le modèle économique de la multifonctionnalité européenne (financement de tous les services grâce aux revenus du bois) semble de moins en moins tenable, et les mécanismes actuels de paiement des services écosystémiques sont complexes, d'une efficacité aléatoire (coûts, fuites, effets d'aubaine) et pas forcément équitables (Karsenty, 2011) ; même lorsque la valeur du service peut être mesurée de façon objective (voir les analyses d'Abildtrup *et al.* (2013) sur la contribution forestière au prix local de l'eau potable), la fourniture du service reste considérée comme gratuite,
- Les lacunes dans la représentation des intérêts : quelles sont la portée et l'efficacité de concertations locales (aménagement forestiers, chartes forestières de territoires...), alors que

les acteurs concernés par les différents services sont parfois très éloignés géographiquement (Brédif *et al.*, 2008), que la plupart des enjeux pour la ressource forestière discutée s'insèrent dans des problématiques plus vastes, interrégionales voire globales (effet de serre, biodiversité, commerce international des bois, approvisionnements industriels) et que l'interdépendance entre politiques d'usage des sols dans différentes régions du monde est désormais manifeste (Meyfroidt *et al.*, 2010 ; Peters *et al.*, 2011), sans pour autant que ces interdépendances se traduisent en termes de représentation dans la délibération collective (Descola, 2014) ?

- La prégnance des risques et de l'incertitude : avec le développement de la résilience, de la réversibilité et des capacités adaptatives, la diversification est un principe assez largement accepté pour redéfinir des modalités de gestion durable (Millar *et al.*, 2007 ; Day et Perez, 2013) ; les principales options de diversification actuellement discutées sont le changement d'espèces/provenances (Meason et Mason, 2013), le recours au mélange pour tamponner l'effet des perturbations d'origine biotique (nombreuses références, dont Jactel *et al.*, 2009) et la conduite en futaie irrégulière (Brang *et al.*, 2013 ; O'Hara et Ramage, 2013) ; d'autres options concernent la diversification des modes de renouvellement, y compris la migration assistée (Aitken *et al.*, 2008 ; Lefèvre *et al.*, 2013) et la combinaison d'itinéraires à termes d'exploitabilité différents au sein des mêmes massifs.

Ce champ de la définition des méthodes de gestion forestière, malgré son apparence conceptuelle, a une grande importance pratique en ce moment. Parmi les questions qui reviennent régulièrement :

- Peut-on illustrer concrètement ce que recouvrent des expressions comme « option sans regret » ou « chemin réversible » vis-à-vis du réchauffement climatique ? Sur les stations de plaine où l'avenir du chêne pédonculé ou du hêtre paraît compromis, la transformation par plantation paraît constituer un exemple d'option sans regret, puisque ces essences ont la capacité à se maintenir en mélange : les réticences qui s'expriment néanmoins sur ce mode d'adaptation reflètent une difficulté, plus sociale qu'écologique, à accepter une transformation intentionnelle et visible des forêts,
- Quels outils de gestion sont praticables lorsqu'on anticipe que l'environnement va changer plus vite que la durée de vie des essences (cf le caractère fixiste des catalogues de station, tables de production, régions de provenance...) ? Au-delà des tentatives visant à historiciser certaines références (faisceaux de courbes de croissance correspondant à des générations de peuplements (Bontemps *et al.*, 2007)), la disponibilité de bases de données géoréférencées et de modélisations plus précises (Watt *et al.*, 2010 ; Richard *et al.*, 2013) ouvre la perspective d'outils de calcul de portée locale pour l'aide à la décision ; sur ce point, un verrou à lever sera de décliner localement, à l'échelle parcelle, les prévisions fournies par les modèles climatiques,
- Dans un but d'apprentissage, prévention des risques et recherche de résilience organisationnelle, comment répartir les options de gestion sur le territoire, planifier leur déploiement et organiser le retour d'expérience ? Ainsi, les différentes stratégies pour mélanger des espèces d'arbres (par bandes, rideaux ou alternances de peuplements), ou les différentes voies de renouvellement (régénération naturelle ordinaire, migration assistée, plantation d'espèces apparentées) pourraient faire l'objet d'un monitoring spécifique ; plus généralement, le besoin de planifier, définir des priorités et renforcer la logistique sera amplifié (allocation optimale des investissements en plantation, amendements, restauration de l'équilibre forêt-gibier, création de places de dépôt...) ; compte-tenu de la rapidité du changement et du fait que les capacités de réaction seront vraisemblablement saturées, Millar *et al.* (2007) proposent de s'inspirer des méthodes de triage adoptées pour soigner les blessés au combat,
- Quelle place donner aux leviers génétique et amendement dans les stratégies d'adaptation ? Ainsi, la politique nationale d'adaptation au changement climatique (MEDDTL, 2011) définit la gestion des ressources génétiques comme la mesure-phare pour la forêt (voir aussi Kapeller *et*

al., 2012 ; Alfaro *et al.*, 2014) ; la poursuite de l'amélioration génétique, en cherchant à combiner productivité, qualité et résistance pour les usages et contextes attendus, est considérée comme un facteur de progrès essentiel dans les grands pays forestiers (Berlin *et al.*, 2012 ; Darychuk *et al.*, 2012 ; Sánchez *et al.*, 2013) ; néanmoins, sous l'influence des conceptions naturalistes très anciennes en France (Lorentz et Parade, 1837), revivifiées par la sylviculture dite « *proche de la nature* » depuis 30 ans, on observe des réactions de rejet à la simple évocation des possibilités qu'offrent l'amélioration génétique ou l'amendement ; le changement culturel sur les références de durabilité, considéré par von Teuffel (1999) comme une conséquence nécessaire des changements environnementaux, reste donc un verrou et, dans une large mesure, un impensé des problématiques du changement climatique.

Sur ces questions de formulation générale des stratégies de gestion, les praticiens peuvent bénéficier de nombreux éclairages disciplinaires proposés par la recherche (écologie, pathologie, génétique...). L'ONF a choisi de concentrer ses efforts autour des questions suivantes :

- La bonne gestion des sols : fertilité chimique, en lien avec l'intensité de prélèvement des menus bois riches en nutriments, et qualité physique et biologique, en lien avec la mécanisation des travaux sylvicoles et de l'exploitation (Burger, 2009 ; Helmisaari *et al.*, 2011) ; dans les deux cas, on s'intéresse à la fois à la prévention des dégâts (par exemple à travers la spécification de procédures et/ou de machines à faible impact), à leur réparation lorsqu'ils ont eu lieu (les dégâts sont plus difficiles à éviter dans les situations de récolte de sauvetage après des dégâts majeurs), ou à la compensation (restituer par des amendements la fertilité exportée en excès par rapport aux possibilités spontanées de l'écosystème),
- La restauration de l'équilibre forêt-gibier, les dégâts de gibier excessifs observés dans de nombreuses forêts ayant un impact très défavorable sur le rythme et les coûts de renouvellement, les chances de succès des plantations, la qualité des régénérations, ainsi que leur diversité spécifique et génétique (ONF, 2013),
- La sylviculture, en améliorant les capacités des modèles de croissance pour concevoir de façon plus souple des itinéraires sylvicoles sous forte contrainte climatique, mais aussi pour évaluer les multiples performances des options disponibles (Deleuze et Houllier, 1998 ; Le Moguédec et Dhôte, 2012 ; Trouvé *et al.*, 2014) et sur la réussite des plantations (maîtriser la végétation par des méthodes chimiques ou mécaniques, améliorer la qualité de l'enracinement, gage de meilleure résistance à la sécheresse, raisonner les coûts sur l'ensemble de l'itinéraire sylvicole (Wehrle, 2012),
- Développer l'ingénierie des mélanges d'essences : peut-on préciser les gains de productivité et surplus de résilience apportés par des mélanges déjà constitués en forêt, leur sensibilité aux conditions biotiques et abiotiques (Jactel et Brockerhoff, 2007 ; Pinto *et al.*, 2008 ; Bontemps *et al.*, 2012 ; Toïgo *et al.*, 2014 ; Grossiord *et al.*, 2014) ? Pour échapper à l'explosion combinatoire, peut-on imaginer *a priori*, à partir des traits de vie et valeurs d'usage des espèces, des mélanges à expérimenter en priorité pour l'adaptation au changement climatique ?
- Appliquer la télédétection et les technologies d'acquisition de données à haut débit (*big data*) à une meilleure connaissance des forêts (topographie, desserte, inventaire, cubage), afin de faciliter l'aménagement forestier, la localisation des ressources, leur exploitation en cours de saison, le dimensionnement et l'exécution des contrats d'approvisionnement.

Conclusion

Vis-à-vis de l'histoire évolutive de la biodiversité forestière, le changement climatique attendu sera très rapide et exercera des contraintes sans précédent. Il pourrait provoquer l'apparition de phénomènes

émergents (communautés non-analogues, surprises écologiques) et de crises systémiques liées à des combinaisons de dommages (tempêtes, sécheresses, ravageurs, incendies). Pour la gestion durable des forêts, c'est par conséquent un facteur structurant de transformation : le changement climatique ne fait pas disparaître les autres facteurs globaux ou locaux (usage des sols, changements socio-économiques, innovations de procédés, environnement industriel, pollutions atmosphériques), mais par l'ampleur de ses manifestations possibles et du fait des incertitudes qui le constituent, il oblige à réviser toutes les facettes de la gestion durable et à considérer les autres facteurs d'évolution dans leurs interactions avec le changement climatique.

Lorsqu'on décline les différents points de vue (adaptation, atténuation, services écosystémiques), il n'apparaît pas de contradictions flagrantes entre les préconisations de gestion. Pour éviter les discontinuités les plus préjudiciables dans la fourniture des services écosystémiques, la gestion courante et les approvisionnements de la filière bois, les meilleures perspectives sont offertes par une attitude d'adaptation pro-active, qui anticipe les conséquences possibles et s'y prépare. Celle-ci suppose d'une part une sylviculture active, d'autre part une gestion dynamique et intégrée de la biodiversité, y compris la diversité génétique, en tenant compte des processus évolutifs et en explicitant les différents objectifs poursuivis à la lumière du changement climatique (biodiversité vs naturalité, gestion vs conservation, entretien de la diversité vs valorisation du progrès génétique) et la manière dont ils seront mis en œuvre dans les territoires.

Simultanément, à travers une production et une mobilisation accrues du bois, la gestion des forêts peut apporter des ressources pour l'atténuation des risques, ainsi que des solutions pour les transitions énergétique et écologique. Le bois est un matériau aux multiples performances, moderne et polyvalent, qui se prête à de nombreuses innovations de process et d'usages. La plupart des usages émergents, par des procédés de décomposition-recomposition, valorisent des tissus particuliers et des bois de diamètres moyens, un contexte nouveau à la lumière duquel on devra examiner les sylvicultures à courte révolution. Le matériau confère à la filière forêt-bois un caractère exemplaire, à condition de mobiliser durablement la ressource, de renforcer la rentabilité de la gestion, et d'améliorer l'acceptation des coupes et travaux en sensibilisant le grand public au lien entre matériau-bois et sylviculture.

Les opportunités nouvelles de valorisation des bois en germe dans la bioéconomie, la prégnance des incertitudes et des risques justifient de diversifier les options de gestion. Plusieurs voies de diversification sont discutées : changement d'essences/matériel végétal, forêts mélangées, diversification des modes de renouvellement ou des termes d'exploitabilité. Il paraît utile d'évaluer chacune de ces options et d'envisager les possibilités de les combiner, afin d'augmenter la résilience du système de gestion dans son ensemble.

Les besoins de R&D identifiés concernent plusieurs verrous de nature biotechnique : 1) assimiler, produire et utiliser une information dynamique plus riche, sur les stations, peuplements et pratiques de gestion ; 2) choisir des essences et un matériel végétal performants et à bon potentiel adaptatif ; 3) en sylviculture, apporter des solutions pour la mécanisation, la réussite des plantations et la bonne gestion des sols ; 4) mobiliser plus efficacement la ressource, notamment grâce à la télédétection et aux nouvelles données à haut débit ; 5) perfectionner les normes pour gérer les écosystèmes sous pression accrue de récolte ; 6) reformuler les options de gestion durable à partir d'analyses de viabilité et évaluations multi-critères ; 7) développer la recherche opérationnelle en appui à la planification des investissements.

Enfin, l'analyse a mis en exergue plusieurs verrous de nature plus socio-économique, culturelle ou politique : besoin d'adapter au contexte actuel les valeurs sous-jacentes à la gestion durable issues du début du 19^{ème} siècle (restauration des forêts, imitation de la nature...) ; difficulté contemporaine à accepter une sylviculture transformant les forêts de manière intentionnelle et visible ; urbanisation des sociétés et déconnexion cognitive entre matériau-bois (image positive) et sylviculture (image négative) ; besoin d'explicitier quelles biodiversités et quels services écosystémiques sont recherchés, en

formalisant les incompatibilités, synergies, compromis et arbitrages associés. L'ensemble de ces questions devrait être plus fortement investi par les sciences humaines et sociales, en s'efforçant de proposer des solutions et leviers efficaces pour faciliter les transformations appelées par le changement climatique.

Remerciements

Le Département Recherche-Développement-Innovation de l'ONF bénéficie du soutien de l'Etat, géré par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir, portant la référence ANR-11-LABX-0002-01 (Laboratoire d'Excellence ARBRE). Les auteurs remercient le Comité Scientifique de l'ONF, Paul Arnould, Alain Bailly, Jean-Charles Bastien, Jean-Daniel Bontemps, Yves Birot, Benoît Cuillier, Mériem Fournier, Bernard Gamblin, Gwenaëlle Gibaud, Jean-Michel Leban, Laurence Lefebvre, François Lefèvre, Jean-Luc Peyron, Claudine Richter, Leopoldo Sánchez, Jean-Philippe Terreaux, Jean-François Toussaint pour leurs réflexions et suggestions qui ont nourri la présente analyse.

Références bibliographiques

Abildtrup J., Garcia S., Stenger A., 2013. The effect of forest land use on the cost of drinking water supply: A spatial econometric analysis. *Ecological Economics* 93, 126-136

Achat D.L., Deleuze C., Landmann G., Pousse N., Ranger J., Augusto L., 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 348, 124–141. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.042

Adams W.T., Zuo J.H., Shimizu J.Y., Tappeiner J.C., 1998. Impact of alternative regeneration methods on genetic diversity in coastal douglas-fir. *Forest Sci.* 44(3), 390-396.

ADEME, 2013. Vision 2030-2050 - Alimentation / agriculture/ forêt. *Comm. orale au séminaire «Vision Energie 2030-2050 de l'ADEME», AgroParisTech Paris, 2013/3/14, 43 slides.*

Agren G.I., Hyvönen R., 2003. Changes in carbon stores in Swedish forest soils due to increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semi-empirical model. *Forest Ecology and Management* 174, 25-37

Aitken S.N., Yeaman S., Holliday J.A., Wang T., Curtis-McLane S., 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1, 95–111

Alfaro R.I., Fady B., Vendramin G.G., Dawson I.K., Fleming R.A., Sáenz-Romero C., Lindig-Cisneros R.A., Murdock T., Vinceti B., Navarro C.M., Skråppa T., Baldinelli G., El-Kassaby Y.A., Loo J., 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management* 333, 76-87

Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., Kitzberger T., Rigling A., Breshears D.D., Hogg E.H. (Ted), Gonzalez P., Fensham R., Zhang Z., Castro J., Demidova N., Lim J.-H., Allard G., Running S.W., Semerci A., Cobb N., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259, 660–684

Araújo M.B., Alagador D., Cabeza M., Nogués-Bravo D., Thuiller W., 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* 14, 484–492.

Augusto L., Bakker M.R., Meredieu C., 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems - potential benefits and drawbacks. *Plant & Soil* 306, 181-198

Bastien J.-C., Marron N., Berthelot A., Brignolas F., Maury S., Charnet F., Merzeau D., 2013. Nouveaux concepts de cultures ligneuses durables pour la production de biomasse à des fins énergétiques - *SYLVABIOM (Rapport final de Convention ANR, Programme BIOENERGIES 2008). INRA, Orléans (France), 31p*

Beaumont L.J., Pitman A., Perkins S., Zimmermann N.E., Yoccoz N.G., Thuiller W., 2011. Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions. *Proc. National Acad. Sci.* 108(6), 2306–2311

- Becker M., Levy G., 1988. A propos du dépérissement des forêts : climat, sylviculture et vitalité de la sapinière vosgienne. *Revue forestière française* 40(5), 345-358
- Bellassen V., Luysaert S., 2014. Managing forests in uncertain times. *Nature* 506, 153–155.
- Benito-Garzón M., Alía R., Robson T.M., Zavala M.A., 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 20, 766–778.
- Berlin M., Sonesson J., Bergh J., Jansson G., 2012. The effect of fertilization on genetic parameters in *Picea abies* clones in central Sweden and consequences for breeding and deployment. *Forest Ecology and Management* 270, 239–247.
- Bertrand R., Lenoir J., Piedallu C., Riofrío-Dillon G., Ruffray (de) P., Vidal C., Pierrat J.C., Gégout J.C., 2011. Changes in plant community composition lag behind climate warming in lowland forests. *Nature* 479, 517-520
- Bolte A., Ammer C., Löff M., Madsen P., Nabuurs G.J., Schall P., Spathelf P., Rock J., 2009. Adaptive forest management in central Europe : Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24(6), 473-482
- Bontemps J.D., Duplat P., Hervé J.C., Dhôte J.F., 2007. Croissance en hauteur dominante du hêtre dans le Nord de la France : des courbes de référence qui intègrent les tendances à long terme. *Rendez-Vous Techniques hors série n°2*, 39–47.
- Bontemps J.D., Hervé J.C., Leban J.M., Dhôte J.F., 2011. Nitrogen footprint in a long-term observation of forest growth over the twentieth century. *Trees - Structure and Function* 25(2), 237-251
- Bontemps J.D., Hervé J.C., Duplat P., Dhôte J.F., 2012. Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. *Oikos* 121(8), 1287-1299
- Bontemps J.-D., Bouriaud O., 2013. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. *Forestry*. doi:10.1093/forestry/cpt034
- Bouget C., Lassauce A., Jonsell M., 2012. Effects of fuelwood harvesting on biodiversity — a review focused on the situation in Europe. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 1421–1432.
- Bouget, C., Parmain, G., Gilg, O., Noblecourt, T., Nusillard, B., Paillet, Y., Pernot, C., Larrieu, L., Gosselin, F., 2014. Does a set-aside conservation strategy help the restoration of old-growth forest attributes and recolonization by saproxylic beetles? *Animal Conservation* 17, 342–353
- Brang P., Spathelf P., Larsen J.B., Bauhus J., Boncina A., Chauvin C., Drossler L., Garcia-Guemes C., Heiri C., Kerr G., Lexer M.J., Mason B., Mohren F., Muhlethaler U., Nocentini S., Svoboda M., 2014. Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87, 492–503
- Bréda N., Huc R., Granier A., Dreyer E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann. Forest Sci.* 63(6), 625-644.
- Brédif H. (éd.), Bailly A., Valenzisi M., Arnould P., Calugaru C., Nougarede O., 2008. Contribution à l'élaboration d'une approche stratégique de la multifonctionnalité des forêts - Synthèses et recommandations (*Rapport final, Convention n° 59-02 E 01/05 Ministère de l'Agriculture et de la Pêche*). FCBA-ENS LSH-INRA/MONA, Paris, 20p.
- Broadmeadow M.S.J., Ray D., Samuel C.J.A., 2005. Climate change and the future for broadleaved tree species in Britain. *Forestry* 78(2), 145-161
- Burger J.A., 2009. Management effects on growth, production and sustainability of managed forest ecosystems : Past trends and future directions. *Forest Ecology and Management* 258, 2335-2346
- Canadell J.G., Raupach M.R., 2008. Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320, 1456-1457
- Carle J.F., MacLean D.A., Erdle T.A., Roy R.J., 2011. Integration of bioenergy strategies into forest management scenarios for Crown land in New Brunswick, Canada. *Can. J. For. Res.* 41, 1319–1332.

- Carnicer J., Coll M., Ninyerola M., Pons X., Sánchez G., Peñuelas J., 2011. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. National Acad. Sci.* 108(4), 1474-1478
- Caurla S., Delacôte P., 2013. FFSM : un modèle de la filière forêts-bois française qui prend en compte les enjeux forestiers dans la lutte contre le changement climatique. *INRA Sciences Sociales* 4.
- Celzard A., Leban J.M., 2013. De nouveaux matériaux à base de bois: un contexte, des exemples. *Revue Forestière Française* 65, 463–478.
- Charru M., Seynave I., Morneau F., Bontemps J.D., 2010. Recent changes in forest productivity: an analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management* 260(5), 864-874
- Chatry C., Le Quentrec M., Laurens D., Le Gallou J.Y., Lafitte J.J., Creuchet B., 2010. Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêt. *Rapport de la mission interministérielle CGAAER-CGEDD-IGA, Paris, juillet 2010, 190p.*
- Cheaib A., Badeau V., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrière E., François C., Gritti E.S., Legay M., Pagé C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P., 2012. Climate change impacts on tree ranges: model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters* 15, 533–544
- Chen J., Colombo S.J., Ter-Mikaelian M.T., Heath L.S., 2010. Carbon budget of Ontario's managed forests and harvested wood products, 2001-2100. *Forest Ecology & Management* 259, 1385-1398
- Chevassus-au-Louis B., Bielsa S., Martin G., Pujol J.L., Richard D., Salles J.M., 2009. Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes - Contribution à la décision publique. *Rapport au Centre d'Analyse Stratégique, Paris, 399p.*
- Ciais P., Schelhaas M.J., Zaehle S., Piao S.L., Cescatti A., Liski J., Luysaert S., Le Maire G., Schulze E.D., Bouriaud O., Freibauer A., Valentini R., Nabuurs G.J., 2008. Carbon accumulation in European forests. *Nature Geoscience* 1, 1-5
- Cole D.N., 2008. Wilderness restoration. From philosophical questions about naturalness to tests of practical techniques. *International Journal of Wilderness* 14(1), 32 et 42
- Colin A., 2014. Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier et au développement de la biomasse énergie en France aux horizons 2020 et 2030 - Tâches C et D. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en 2020 et 2030, selon différents scénarios d'offre de bois (*Rapport final, mars 2014 Convention MEDDE.DGEC / IGN n°2200682886*). *IGN, Nancy (France), 55p*
- Collins B.J., Rhoades C.C., Battaglia M.A., Hubbard R.M., 2012. The effects of bark beetle outbreaks on forest development, fuel loads and potential fire behavior in salvage logged and untreated lodgepole pine forests. *Forest Ecology and Management* 284, 260–268.
- Colonna P., 2012. Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques. Leçon inaugurale n°223. Collège de France, Paris, 114p.
- Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., *et al.*, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- Dahlberg A., Thor G., Allmér J., Jonsell M., Jonsson M., Ranius T., 2011. Modelled impact of Norway spruce logging residue extraction on biodiversity in Sweden. *Can. J. For. Res.* 41, 1220–1232.
- Darychuk N., Hawkins B.J., Stoehr M., 2012. Trade-offs between growth and cold and drought hardiness in subarctic Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 1530–1541.
- Davis M.A., Chew M.K., Hobbs R.J., Lugo A.E., Ewel J.J., Vermeij G.J., Brown J.H., Rosenzweig M.L., Gardener M.R., Carroll S.P., Thompson K., Pickett S.T.A., Stromberg J.C., Del Tredici P., Suding K.N., Ehrenfeld J.G., Grime J.P., Mascaró J., Briggs J.C., 2011. Don't judge species on their origins. *Nature* 474, 153-154
- Day J.K., Pérez D.M., 2013. Reducing uncertainty and risk through forest management planning in British Columbia. *Forest Ecology and Management* 300, 117-124

- Deleuze C., Houllier F., 1998. A simple process-based xylem growth model for describing wood microdensitometric profiles. *Journal of Theoretical Biology* 193, 99–113.
- Deleuze C., Micheneau C., Richter C., Boulanger V., Gardette Y.M., Brêthes A., Gibaud G., Augusto L., Dupont C., Gautry, J.-Y., et al., 2012. Le retour de cendres en forêt: opportunités et limites. *Rendez-Vous Techniques* 35, 16–28.
- Deleuze C., Morneau F., Contant T., Saint-André L., Bouvet A., Colin A., Vallet P., Gauthier A., Jaeger M., 2013. Le projet EMERGE pour des tarifs cohérents de volumes et biomasses des essences forestières françaises métropolitaines. *Rendez-vous Techniques* 39-40, 32-36
- Descola P., 2014. Les choix du monde de demain. *Communication au colloque « L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? Options futures et marges d'acceptation », Collège de France, Paris, 23 mai 2014*
- Detten R., 2010. Sustainability as a guideline for strategic planning? The problem of long-term forest management in the face of uncertainty. *European Journal of Forest Research* 130, 451–465.
- van Deusen P., 2010. Carbon sequestration potential of forest land: Management for products and bioenergy versus preservation. *Biomass & Bioenergy* 34(12), 1687-1694
- Diaz-Balteiro L., Rodriguez L.C.E., 2006. Optimal rotations on Eucalyptus plantations including carbon sequestration - A comparison of results in Brazil and Spain. *Forest Ecol. and Manag.* 229, 247-258
- Doyen L., Thébaud O., Béné C., Martinet V., Gourguet S., Bertignac M., Fifas S., Blanchard F., 2012. A stochastic viability approach to ecosystem-based fisheries management. *Ecological Economics* 75, 32–42.
- Dunlop M., Brown P., 2008. Implications of climate change for Australia's National Reserve System: a preliminary assessment. *Report to the Department of Climate Change, and the Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, 196p.*
- Dupouey J.L., Dambrine E., Laffite J.D., Moares C., 2002. Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology* 83, 2978–2984.
- Eriksson L.O., Gustavsson L., Hänninen R., Kallio M., Lyhykäinen H., Pingoud K., Pohjola J., Sathre R., Solberg B., Svanaes J., Valsta L., 2011. Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework. *European Journal of Forest Research* 131, 131–144
- Foley T.G., Richter D.B., Galik C.S., 2009. Extending rotation age for carbon sequestration: A cross-protocol comparison of North American forest offsets. *Forest Ecology & Management* 259, 201-209.
- Forest Europe, 1993. Résolution H1 - General guidelines for the sustainable management of forests in Europe. http://www.foresteurope.org/docs/MC/MC_helsinki_resolutionH1.pdf
- Gauquelin X. (coord.), Bréda N., Legay M., Nageleisen L.M., Picard O., 2010. Guide de gestion des forêts en crise sanitaire. Institut pour le Développement Forestier, Paris, 97p.
- GIEC, 2013. Changements climatiques 2013 - Les éléments scientifiques - Résumé à l'intention des décideurs (Contribution du groupe de travail 1 au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). OMM-PNUE. <http://www.climatechange2013.org>, 34p.
- Giraud G., 2014. Illusion financière - Des subprimes à la transition écologique (troisième édition revue et augmentée), *L'Atelier en poche. Les éditions de l'atelier, Ivry/Seine (France), 256p.*
- Goldstein J.H., Caldarone G., Duarte T.K., Ennaanay D., Hannahs N., Mendoza G., Polasky S., Wolny S., Daily G.C., 2012. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 7565–7570.
- González-García S., Mola-Yudego B., Murphy R.J., 2013. Life cycle assessment of potential energy uses for short rotation willow biomass in Sweden. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 783–795
- Grossiord C., Granier A., Ratcliffe S., Bouriaud O., Bruehlheide H., Checko E., Forrester D.I., Dawud S.M., Finer L., Pollastrini M., Scherer-Lorenzen M., Valladares F., Bonal D., Gessler A., 2014. Tree diversity does not always improve resistance of forest ecosystems to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. doi:10.1073/pnas.1411970111

- Hall T., 2012. Bioéconomie au niveau européen. *Communication devant le Conseil scientifique de FCBA, Paris, 14 fév. 2012, 36 diapos*
- Hamrick J.L., 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *For. Ecol. Manage.* 197, 323-335.
- Hanewinkel M., Cullmann D.A., Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J., Zimmermann N.E., 2012. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change* 3, 203-207
- Hanewinkel M., Peyron J.-L., 2014. Tackling climate change—the contribution of scientific knowledge in forestry. *Annals of Forest Science* 71, 113–115
- Helmisaari H.S., Hanssen K.H., Jacobson S., Kukkola M., Luro J., Saarsalmi A., Tamminen P., Tveite B., 2011. Logging residue removal after thinning in Nordic boreal forests: Long-term impact on tree growth. *Forest Ecol. Management* 261(11), 1919-1927
- Hetemäki L., Lindner M., Mavsar R., Korhonen M., 2014. Future of the European Forest-Based Sector: Structural Changes Towards Bioeconomy, *What Science can tell us. European Forest Institute, Joensuu (Finland), 110p.*
- Hewitt N., Klenk N., Smith A.L., Bazely D.R., Yan N., Wood S., MacLellan J.I., Lipsig-Mumme C., Henriques I., 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation* 144, 2560–2572.
- Houllier F., 2011. Une expertise à transférer. *Forêt-Entreprise* 200, 56-59
- IFN, FCBA, SOLAGRO, 2009. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. *Rapport final du Contrat n°0601C0134 coordonné par l'ADEME (Département Bioressources, Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques), Angers, Novembre 2009, 105p.*
- INRA-CIRAD, 2009. Agrimonde - Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. Note de synthèse, INRA Paris, fév. 2009, 34p. <http://www5.paris.inra.fr/depe/Projets/Agrimonde>
- INRA, 2015. Addressing food dependency in North Africa and the Middle East through the year 2050. INRA/PluriAgri Conference, 28 October 2015 (<https://colloque.inra.fr/pluriagri2015/Page-d-accueil/LA-REGION-AFRIQUE-DU-NORD-MOYEN-ORIENT-A-L-HORIZON-2050>)
- Jactel H., Brockerhoff E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters* 10(9), 835–848
- Jactel H., Nicoll B.C., Branco M., Gonzalez-Olabarria J.R., Grodzki W., Långström B., Moreira F., Netherer S., Orazio C., Piou D., Santos H., Schelhaas M.J., Tojic K., Vodde F., 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Ann. For. Sci.* 66(7), 701
- Jactel H., 2011. Des catastrophes en chaîne, l'exemple du massif Aquitain. *Comm. Journée "Santé des forêts", IDF, Paris, 17 mai 2011*
- Jancovici J.M., Grandjean, A., 2006. Le plein s'il vous plait! La solution au problème de l'énergie, *Sciences. Seuil, Paris, 186p.*
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D.W., Minkinen K., Byrne K.A., 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137, 253-268
- Kallio A.M.I., Anttila P., McCormick M., Asikainen A., 2011. Are the Finnish targets for the energy use of forest chips realistic - Assessment with a spatial market model. *Journal of Forest Economics* 17, 110–126.
- Kapeller S., Lexer M.J., Geburek T., Hiebl J., Schueler S., 2012. Intraspecific variation in climate response of Norway spruce in the eastern Alpine range: Selecting appropriate provenances for future climate. *Forest Ecology and Management* 271, 46–57.
- Karsenty A., 2011. Coupler incitation à la conservation et investissement. *Perspective - Politiques de l'environnement, n°7, CIRAD Montpellier, janvier 2011, 4 p*

- Kebbi-Benkeder Z., Colin F., Dumarçay S., Gérardin P., 2014. Quantification and characterization of knotwood extractives of 12 European softwood and hardwood species. *Annals of Forest Science*. doi:10.1007/s13595-014-0428-7
- Klos R.J., Wang G.G., Bauerle W.L., Rieck J.R., 2009. Drought impact on forest growth and mortality in the southeast USA: an analysis using forest health and monitoring data. *Ecological Applications* 19(3), 699-708
- Kochi I., Champ P.A., Loomis J.B., Donovan G.H., 2012. Valuing mortality impacts of smoke exposure from major southern California wildfires. *Journal of Forest Economics* 18, 61–75.
- Korpel S., 1995. Die Urwälder der Westkarpaten. *Fischer Vlg, Stuttgart*, 310 p
- Kremer A., Delzon S., 2009. Adaptive responses of trees. *EFI News* 17, 6
- Kremer A., 2009. Des invasions pas si négatives. *Pour la Science*, dossier 65, 108-109
- Kurz W.A., Apps M.J., 1999. A 70-year retrospective analysis of carbon fluxes in the Canadian forest sector. *Ecological Applications* 9, 526–547.
- Lacoste C., Pizzi A., Laborie M.-P., Celzard A., 2014. *Pinus pinaster* tannin/furanic foams: Part II. Physical properties. *Industrial Crops and Products* 61, 531–536
- Lagadec P., 2010. Risques et crises en Terra Incognita. *ParisTech Review*, 11 octobre 2010, <http://www.paristechreview.com/2010/10/11/risques-crisis-terra-incognita/>
- Lambin E.F., Meyfroid P., 2011. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proc. National Acad. Sci.* 108(9), 3465–3472.
- Latham R.E., Ricklefs R.E., 1993. Continental comparisons of temperate-zone tree species diversity. In: *Species Diversity in Ecological Communities: Historical and Geographical Perspectives*, (Univ. of Chicago Press), pp. 294–314.
- Le Moguédec G., Dhôte J.F., 2012. Fagacées: a tree-centered growth and yield model for sessile oak (*Quercus petraea* L.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science* 69(2), 257-269
- Lefèvre F., Boivin T., Bontemps A., Courbet F., Davi H., Durand-Gillmann M., Fady B., Gauzere J., Gidoïn C., Karam M.-J., Lalagüe H., Oddou-Muratorio S., Pichot C., 2013. Considering evolutionary processes in adaptive forestry. *Annals of Forest Science* 71(7), 723-739
- Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A., De Ruffray P., Brisse H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320, 1768–1771
- Lindner M., Garcia-Gonzalo J., Kolström M., Green T., Reguera R., Maroschek M., Seidl R., Lexer M.J., Netherer S., Schopf A., Kremer A., Delzon S., Barbati A., Marchetti M., Corona P., 2008. Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation. *Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development (AGRI-2007-G4-06), European Forest Institute, Helsinki (Finlande), nov. 2008, 233 p.*
- Lindner M., Fitzgerald J.B., Zimmermann N.E., Reyer C., Delzon S., van der Maaten E., Schelhaas M.-J., Lasch P., Eggers J., van der Maaten-Theunissen M., Suckow F., Psomas A., Poulter B., Hanewinkel M., 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146, 69–83
- Lippke B., Gustafson R., Venditti R., Steele P., Volk T.A., Oneil E., Johnson L., Puettmann M.E., Skog K., 2012. Comparing life-cycle carbon and energy impacts for biofuel, wood product, and forest management alternatives. *Forest Products Journal* 62, 247–257
- Liski J., Lehtonen A., Palosuo T., Peltoniemi M., Eggers T., Muukkonen P., Mäkipää R., 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Ann. For. Sci.* 63, 687–697.
- Lorentz M., Parade A., 1837. Cours élémentaire de culture des bois (2ème édition). *Thomas et Cie. ed. Nancy (France)*, 564p.
- Loustau D. (coord.), 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et

sylvicoles. *Rapport final du projet Carbofor, Programme GICC 2001. Inra, IFN, Cirad, Météo France, Université d'Orléans, Université Paris-Sud 11, CNRS, Engref, LSCE. 138 p.*

Mace G.M., Norris K., Fitter A.H., 2012. Biodiversity and ecosystem services: a multilayered relationship. *Trends in Ecology & Evolution* 27, 19–26.

Masson-Delmotte V., 2011. Contexte et perspectives sur le réchauffement climatique. *Audition par le Groupe de travail Adaptation et Prospective, Haut Conseil de la Santé Publique, Paris, 22 septembre 2011.*

Mathijs E., Brunori G., Carus M., Griffon M., Last L., Gill M., Koljonen T., Lehoczy E., Olesen I., Potthast A., 2015. Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy - A Challenge for Europe (Stand Committee on Agricultural Research - 4th Foresight Exercise). *Commission Européenne, Bruxelles, 153p.*

May B., England J.R., Raison R.J., Paul K.I., 2012. Cradle-to-gate inventory of wood production from Australian softwood plantations and native hardwood forests: Embodied energy, water use and other inputs. *Forest Ecology and Management* 264, 37–50.

McLachlan J.S., Hellmann J.J., Schwartz M.W., 2007. A Framework for Debate of Assisted Migration in an Era of Climate Change. *Conservation Biology* 21, 297–302.

Meason D.F., Mason W.L., 2013. Evaluating the deployment of alternative species in planted conifer forests as a means of adaptation to climate change—case studies in New Zealand and Scotland. *Annals of Forest Science* 71, 239–253

MEDDTL, 2011. Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique, 2011-2015. 188p, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-Plan-national-d-adaptation,22978.html>

Melina Y., Petersson H., Egnell G., 2010. Assessing carbon balance trade-offs between bioenergy and carbon sequestration of stumps at varying time scales and harvest intensities. *Forest Ecology & Management* 260, 536-542

Mermet L., Farcy C., 2011. Contexts and concepts of forest planning in a diverse and contradictory world. *Forest Policy and Economics* 13, 361–365

Meyfroidt P., Rudel T.K., Lambin E.F., 2010. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proc. National Acad. Sci.* 107(49), 20917-20922

Millar C.I., Stephenson N.L., Stephen S.L., 2007. Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications* 17(8), 2145-2151

Moiseyev A., Solberg B., Kallio A.M.I., Lindner M., 2011. An economic analysis of the potential contribution of forest biomass to the EU RES target and its implications for the EU forest industries. *Journal of Forest Economics* 17, 197-213

Moritz M.A., Parisien M.-A., Batllori E., Krawchuk M.A., Van Dorn J., Ganz D.J., Hayhoe K., 2012. Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere* 3, art49.

Nahlik A.M., Kentula M.E., Fennessy M.S., Landers D.H., 2012. Where is the consensus ? A proposed foundation for moving ecosystem service concepts into practice. *Ecological Economics* 77, 27–35.

Navarro A., Facciotto G., Campi P., Mastrotrilli M., 2014. Physiological adaptations of five poplar genotypes grown under SRC in the semi-arid Mediterranean environment. *Trees* 28, 983–994.

Neale D.B., 1985. Genetic implications of shelterwood regeneration of Douglas-fir in Southwest Oregon. *Forest Sci.* 31(4), 995-1005.

Nunery J.S., Keeton W.S., 2010. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology & Management*, 259, 1363-1375

O'Hara K.L., Ramage B.S., 2013. Silviculture in an uncertain world: utilizing multi-aged management systems to integrate disturbance. *Forestry* 86, 401–410

Olsson J., Johansson T., Jonsson B.G., Hjältén J., Edman M., Ericson L., 2012. Landscape and substrate properties affect species richness and community composition of saproxylic beetles. *Forest Ecology and Management* 286, 108–120.

- ONF, 2012. Changement climatique et évolution des usages du bois : quelles incidences sur nos orientations sylvicoles ? - [Colloque ONF des 19-20 juin 2012 à Charenton-le-Pont]. *Rendez-Vous Techniques* 38, 3-114
- ONF, 2013. Restaurer l'équilibre forêt-gibier - [Colloque ONF des 27-28 mai 2013 à Velaine]. *Rendez-Vous Techniques* 41-42, 1-132.
- Paillet Y., Bergès L., Hjalten J., Odor P., Avon C., Bernhardt-Römermann M., Bijlsma R.J., de Bruyn L., Fuhr M., Grandin U., Kanka R., Lundin L., Luque S., Magura T., Matesanz S., Meszaros I., Sebastia M.T., Schmidt W., Standovar T., Tothmeresz B., Uotila A., Valladares F., Vellak K., Virtanen R., 2010. Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation Biology* 24(1), 101-112
- Patterson T.M., Coelho D.L., 2009. Ecosystem services: Foundations, opportunities, and challenges for the forest products sector. *Forest Ecology and Management* 257, 1637-1646.
- Peltola H., Ikonen V.P., Gregow H., Strandman H., Kilpeläinen A., Venäläinen A., Kellomäki S., 2010. Impacts of climate change on timber production and regional risks of wind-induced damage to forests in Finland. *Forest Ecology and Management* 260, 833-845
- Perrings C., Naeem S., Ahrestani F., Bunker D.E., Burkill P., Canziani G., Elmqvist T., Ferrati R., Fuhrman J., Jaksic F. et al., 2010. Ecosystem services for 2020. *Science* 330, 323-324.
- Peters G.P., Minx J.C., Weber C.L., Edenhofer O., 2011. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proc. National Acad. Sci.* 108(21), 8903-8908
- Peterson D.L., Millar C.I., Joyce L.A., Furniss M.J., Halofsky J.E., Neilson R.P., Morelli T.L., Swanston C.W., McNulty S., Janowiak M.K., 2011. Responding to climate change on national forests: a guidebook for developing adaptation options. *US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, editor General Technical Report PNW-GTR-855, 1-118*
- Petterson M., Keskitalo E.C.H., 2013. Adaptive capacity of legal and policy frameworks for biodiversity protection considering climate change. *Land Use Policy* 34, 213-222.
- Pinto P.E., Gégout J.C., Hervé J.C., Dhôte J.F., 2008. Respective importance of ecological conditions and stand composition on *Abies alba* Mill. dominant height growth. *Forest Ecology and Management* 255(3-4), 619-629.
- PIPAME-ALCIMED, 2012. Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020. *Rapport de prospective, Paris: Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques, 204p*
- Pitman R.M., 2006. Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry* 79(5), 563-588
- Rapaport A., Terreaux J.P., Doyen L., 2006. Viability analysis for the sustainable management of renewable resources. *Mathematical and Computer Modelling* 43, 466-484.
- Raunikaar R., Buongiorno J., Turner J.A., Zhu S., 2010. Global outlook for wood and forests with the bioenergy demand implied by scenarios of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Forest Policy and Economics* 12(1), 48-56.
- Rehfeld G.E., Tchebakova N.M., Parfenova Y.I., Wykoff W.R., Kuzmina N.A., Milyutin L.I., 2002. Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology* 8, 912-929.
- Richard J.B., Piedallu C., Gaudin S., Legay M., 2013. Utilisation de cartes prédictives pour améliorer la prise en compte de la contrainte hydrique dans le choix des essences. *Revue Forestière Française* 65(1), 37-56
- Richardson L.A., Champ P.A., Loomis J.B., 2012. The hidden cost of wildfires: Economic valuation of health effects of wildfire smoke exposure in Southern California. *Journal of Forest Economics* 18, 14-35.
- Rötzer T., Dieler J., Mette T., Moshammer R., Pretzsch H., 2010. Productivity and carbon dynamics in managed Central European forests depending on site conditions and thinning regimes. *Forestry* 83(5), 483-496
- Sánchez L., Rozenberg P., Bastien C., 2013. Chapter 5 - Shifting from growth to adaptive traits and competition: the prospect of improving tree responses to environmental stresses. In: *Novel Tree*

- Breeding, Monografias INIA : Serie Forestal. Madrid (Spain) : Instituto Nacional de Investigacion y Tecnologia Agraria y Alimentaria (INIA), pp. 63–76.
- Sathre R., O'Connor J., 2010. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood products substitution. *Environ. Sci. Policy* 13(2), 104-114
- Saxe H., Cannell M.G.R., Johnsen O., Ryan M.G., Vourlitis G., 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. *Tansley Review n°123*. *New Phytologist* 149, 369-400
- Schroter D., Cramer W., Leemans R., Prentice I.C., Araujo M.B., Arnell N.W., Bondeau A., Bugmann H., Carter T.R., Gracia C.A., de la Vega-Leinert A.C., Erhard M., Ewert F., Glendining M.J., House J.I., Kankaanpää S., Klein R.J.T., Lavorel S., Lindner M., Metzger M.J., Meyer J., Mitchell T.D., Reginster I., Rounsevell M., Sabaté S., Sitch S., Smith B., Smith J., Smith P., Sykes M.T., Thonicke K., Thuillier W., Tuck G., Zaehle S., Zierl B., 2005. Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science* 310, 1333–1337.
- Schütz J.P., de Turckheim B., 2010. Gestion forestière multifonctionnelle et biodiversité. *Silva Belgica*, 117(4), 20-27
- Sébillotte M., Cristofini B., Lacaze J.F., Messéan A., Normandin D., 1998. Prospective - La forêt, sa filière et leurs liens au territoire. - Synthèse et scénarios - Répercussions pour la recherche, *INRA-DADP, Paris. INRA, Paris, 250p + Ann. 118p*
- Seidl R., Fernandes P.M., Fonseca T.F., Gillet F., Jönsson A.M., Merganičová K., Netherer S., Arpaci A., Bontemps J.D., Bugmann H., González-Olabarria J.R., Lasch P., Meredieu C., Moreira F., Schelhaas M.J., Mohren F., 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling* 222(4), 903-924
- Seidl R., Lexer M.J., 2013. Forest management under climatic and social uncertainty: Trade-offs between reducing climate change impacts and fostering adaptive capacity. *Journal of Environmental Management* 114, 461–469
- Seppälä R., Buck A., Katila P. (eds.), 2009. Adaptation of Forests and People to Climate Change - A Global Assessment Report. *IUFRO World Series Volume 22. Helsinki. 224 p*
- Ste-Marie C., Nelson E.A., Dabros A., Bonneau M.E., 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle* 87, 724–730.
- Swing K., 2011. Fight for Yasuni Far from Finished. *Science* 331, 29.
- Von Teuffel, T., 1999. Consequences of increased tree growth on forest management planning and silviculture. In: Karjalainen, T., Spiecker, H., Laroussinie, O., « Causes and Consequences of Accelerating Tree Growth in Europe: Proceedings of the International Seminar Held in Nancy, France 14-16 May 1998 ». European Forest Institute, Joensuu (Finland), pp. 229–236
- Thomas R.Q., Canham C.D., Weathers K.C., Goodale C.L., 2010. Increased tree carbon storage in response to nitrogen deposition in the US. *Nature Geoscience* 3, 13-17
- Toïgo M., Vallet P., Perot T., Bontemps J.-D., Piedallu C., Courbaud B., 2014. Over-yielding in mixed forests decreases with site productivity. *Journal of Ecology*, doi:10.1111/1365-2745.12353
- Trouvé R., Bontemps J.-D., Collet C., Seynave I., Lebourgeois F., 2014. Growth partitioning in forest stands is affected by stand density and summer drought in sessile oak and Douglas-fir. *Forest Ecology and Management* 334, 358–368
- UE, 2014. New EU Forest strategy: conclusions adopted by the Council [WWW Document]. URL http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/agricult/142685.pdf (accessed 6.25.14).
- UNECE-FAO, 2011. European Forest Sector Outlook Study II 2010-2030. *Report, Geneva (Switzerland), ISBN 978-92-1-117051-1, 111p.*
- Urban M.C., Tewksbury J.J., Sheldon K.S., 2012. On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279, 2072–2080.
- Verschuyt J., Riffell S., Miller D., Wigley T.B., 2011. Biodiversity response to intensive biomass production from forest thinning in North American forests – A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 261, 221-232

- Walton A., 2013. Provincial-Level Projection of the Current Mountain Pine Beetle Outbreak: Update of the infestation projection based on the Provincial Aerial Overview Surveys of Forest Health conducted from 1999 through 2012 and the BCMPB model (year 10). *Report, British Columbia Forest Service (Canada)*, 13p.
- Watt M.S., Palmer D.J., Kimberley M.O., Höck B.K., Payn T.W., Lowe D.J., 2010. Development of models to predict *Pinus radiata* productivity throughout New Zealand. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 488–499
- Wehrlen L., 2012. Quels outils pour mieux maîtriser la végétation forestière concurrente ? *Forêt-entreprise* 206, 24–31.
- Weih M., 2004. Intensive short rotation forestry in boreal climates: present and future perspectives. *Canadian Journal of Forest Research* 34, 1369–1378
- Werner W., Taverna R., Hofer P., Thürig E., Kaufmann E., 2010. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science & Policy* 13, 72-85
- Wimberly M.C., Liu, Z., 2013. Interactions of climate, fire, and management in future forests of the Pacific Northwest. *Forest Ecology and Management* 327, 270-279
- Winkel G., 2013. Forest conservation policy in a changing climate. *Forest Policy and Economics* 36, 1-5
- Ximenes F., 2006. Carbon Storage in Wood Products in Australia – a review of the current state of knowledge. *Report, Forest and Wood Products Research and Development Corporation, Victoria (Australia)*, 26p.
- Zhu K., Woodall C.W., Clark J.S., 2012. Failure to migrate: lack of tree range expansion in response to climate change. *Global Change Biology* 18, 1042–1052.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)